第 41 卷　第 2 期
2024 年 4 月

应　用　力　学　学　报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 41 No. 2
Apr. 2024

文章编号:1000-4939(2024)02-0330-10

截面型式及槽宽比对高填明洞土压力影响分析

何永泽[1],李盛[1],后浩斌[2],马莉[1],贡力[1],余云燕[1]

(1. 兰州交通大学土木工程学院,730070 兰州;2. 甘肃省交通科学研究院集团有限公司,730030 兰州)

摘　要:利用离散元软件 PFC2D,考虑到土体的离散性与不均匀性,通过分析洞顶平均竖向土压力、内外土柱相对沉降差以及颗粒间接触力链的变化规律,探讨截面型式(矩形、1/4 拱形、1/2 拱形)及槽宽比(B/b=1.5∶1,2∶1,3∶1,4∶1)变化对高填黄土明洞土压力的影响,结合顾安全公式,分析高填明洞沉降差与土压力间的函数关系,并修正该函数,使其可以适用与不同的截面型式与槽宽比下的高填明洞。结果表明:①B/b 确定,明洞采用矩形截面时,接触力链在洞顶分布,平均土压力更大,明洞采用拱形截面时,平均土压力更小,但拱顶存在局部应力集中现象;②明洞截面型式一定,随着 B/b 的增大,洞顶平均竖向土压力与沉降差均随之增大,当 B/b 较小时,边坡作用增强,外侧土柱沉降降低,对内土柱的作用力变小,从而导致明洞顶竖向土压力更小;③内外土柱沉降差与附加土压力呈线性相关,相对于矩形截面,拱形截面下较小的沉降差会产生相同的附加土压力,更有利于结构的稳定。

关键词:高填明洞;截面型式;槽宽比(B/b);PFC2D;土压力;沉降差

中图分类号:TU443　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.007

Analysis of variation laws of the earth pressure with section types and groove-width ratios

HE Yongze[1],LI Sheng[1],HOU Haobin[2],MA Li[1],GONG Li[1],YU Yunyan[1]

(1. College of Civil Engineering,Lanzhou Jiaotong University,730070 Lanzhou,China;
2. Gansu Provincial Transportation Research Institute Group Co.,Ltd.,730030 Lanzhou,China)

Abstract:To explore the influences of section types (rectangular,1/4 arch,1/2 arch) and the groove-width ratio (B/b=1.5∶1,2∶1,3∶1,4∶1) on the earth pressure of the hill-filled cut-and-cover tunnel (HFCCT),this paper used the discrete element software PFC2D to simulate and analyze the evolution laws of the average vertical earth pressure (VEP) on the top of the cut-and-cover tunnel (CCT),the settlement difference between inner and outer soil columns,and the contact force chains among particles. Moreover, the paper analyzed the correlation between the settlement difference and the earth pressure based on the earth pressure theory of culvert and pipe,which was put forward by Gu Anquan,and further modified the function of the above-mentioned theory so as to make it applicable to the different section types and

收稿日期:2022-07-23　　**修回日期**:2023-02-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51868041;51668036);甘肃省基础研究创新群体资助项目(No. 21JR7RA347)

通信作者:李盛,教授。E-mail:ligwin@126.com

引用格式:何永泽,李盛,后浩斌,等. 截面型式及槽宽比对高填明洞土压力影响分析[J]. 应用力学学报,2024,41(2):330-339.
HE Yongze,LI Sheng,HOU Haobin,et al. Analysis of variation laws of the earth pressure with section types and groove-width ratios[J]. Chinese journal of applied mechanics,2024,41(2):330-339.

groove-width ratio (B/b). The results show that ①when the B/b is determined, the contact force chains will distribute on the top of the CCT and the average vertical earth pressure (VEP) is greater if the CCT adopts a rectangular section. The average VEP will decrease if the CCT adopts an arched section. However, there is partly stress concentration at the top of the arched section. ② When the section is determined, the average VEP and settlement difference on the top of CCT both increase with the increase of B/b. As the B/b decreases, the slope effect is enhanced, the settlement of the outer soil column reduces gradually, and the interaction between the inner and outer soil columns declines, which makes the VEP on the top of the CCT decrease. ③ The settlement difference between the inner and outer soil columns is linearly related to the additional earth pressure. Compared with the rectangular section, the same additional earth pressure under the arched section is generated by a smaller differential settlement, which benefits the stability of the structure.

Key words: hill-filled cut-and-cover tunnel (HFCCT); cross-sectional shape; groove-width ratio (B/b); PFC2D; vertical earth pressure; differential settlement

西北地区由于山地较多,高速公路建设往往多受地形限制,修建高填黄土明洞恰能很好地解决这一问题。过高的回填土会对明洞结构受力产生不利影响[1],而槽宽比与截面型式的改变会使高填明洞的受力产生变化[2]。因此,有必要对不同截面型式及槽宽比下的土压力进行分析;并对顾安全公式进行修正,使其可以适用于不同截面型式与槽宽比的高填明洞。

目前,对于高填方结构物土压力方面的研究,国内外学者已有大量成果。李永刚等[3]对矩形沟埋涵洞垂直土压力进行了研究;顾安全[4]提出了减载前后上埋式管道垂直土压力计算公式;郑俊杰等[5]通过现场试验和有限元软件分析了沟埋涵洞涵顶垂直土压力及不均匀沉降的变化规律;周文欢[6]采用数值模拟、理论推导与工程实例相结合的方法,对不同涵洞结构型式的受力及计算方法做了研究,并且就不同涵洞型式,分析了各自的优缺点。对于高填黄土明洞减载方面的研究,则主要集中于在洞顶布设加筋材料或柔性材料减载以改善洞顶受力。VASLESTAD 等[7-8]发现通过在洞顶铺设柔性材料,可以降低结构物顶部的土压力;白冰[9]分析了使用 EPS 板作为减载材料的土压力变化规律,提出可供设计参考的土压力计算值;LEE 等[10]采用数值模拟与室内试验相结合的方法,研究了各减载措施的减载效果。李盛等[11-13]对施加减载措施下的高填明洞洞顶土压力计算公式做了推导,并针对高回填黄土明洞,对其土拱效应做了分析。姚玉相等[14-15]考虑了土体的离散性,研究了各种减载措施下的土拱效应变化规律。李明等[16]依托实际工程,结合数值模拟,确定了采用泡沫土二次回填的合理角度为 45°,合理下挖置换深度为 4 m。而有关高填黄土明洞采用不同截面型式及槽宽比对明洞土压力影响的研究,目前多以有限元方法为主。匡亮等[17-19]采用数值模拟的方法,对明洞衬砌结构受力特性、变形及选型等方面做了研究。

上述针对高填方结构的研究,都是在连续介质理论这一基础上进行的。PFC2D 离散元软件能够考虑到土体的离散性与不均匀性[20],从细观角度分析力链的变化,故本研究采用 PFC2D 进行数值模拟,分析截面型式和槽宽比的改变对明洞洞顶平均竖向土压力以及内外土柱沉降差的影响规律,并从细观角度探讨引起宏观土压力变化的原因。在此基础上,修正顾安全公式,使其可以适用于不同截面型式及槽宽比的高填明洞土压力的计算,以期为高填黄土明洞的设计提供参考。

1　颗粒流数值模拟

1.1　数值模拟概述

采用离散元软件 PFC2D 对各工况进行数值模拟,如图 1 所示,采用矩形、1/4 拱形和 1/2 拱形这 3 种截面型式。槽宽比为模型沟槽宽度(B)与明洞跨径(b)之比,B/b 分别设置为 1.5∶1,2∶1,3∶1和 4∶1。共设置 12 组模拟工况,如表 1 所示。

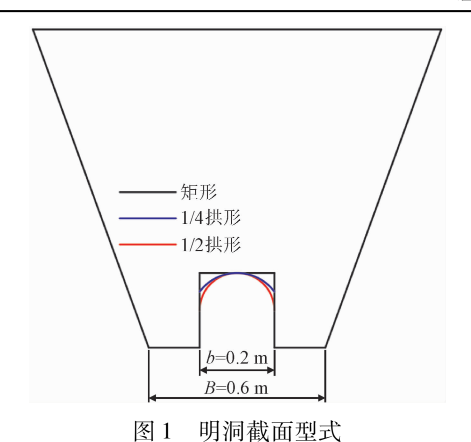


图 1　明洞截面型式

Fig. 1　The section types of cut-and-cover tunnel

表 1　数值模拟工况

Tab. 1　Numerical simulation conditions

槽宽比 (B/b)	工况		
	矩形截面	1/4 拱形截面	1/2 拱形截面
1.5∶1	G1	G5	G9
2∶1	G2	G6	G10
3∶1	G4	G7	G11
4∶1	G4	G8	G12

1.2　模型建立及测点布置说明

由于各工况建模过程相似,因此只对 G11 工况进行详细叙述。模型箱高度 $H=1.3$ m;明洞高度 $h=0.2$ m;沟槽宽度 $B=0.6$ m;明洞宽度 $b=0.2$ m;明洞两侧各宽 0.2 m;边坡坡脚为 70°。模型中边坡、地基、明洞均采用 wall 单元模拟,回填土采用 ball 模拟。采用改进的多层压实方法[21] (IMCM) 模拟分层填土,结合文献[22]中经验,回填土分 6 层填筑于模型箱内,各层填筑高度分别为 0.25、0.2、0.15、0.2、0.2、0.2 m,顶部预留 0.1 m 的空白区域,分层模型如图 2 所示。

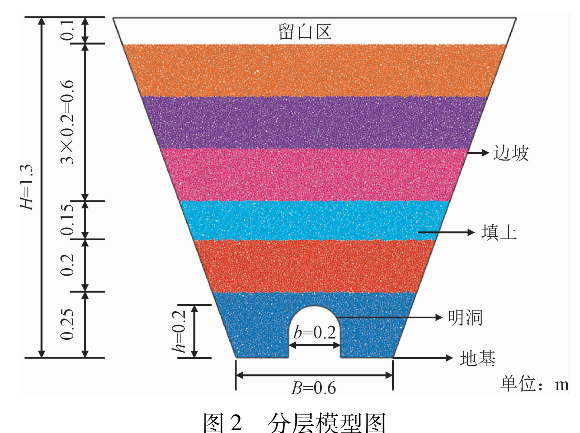


图 2　分层模型图

Fig. 2　Hierarchical mode

分别在 A-A 截面、B-B 截面布置一定数量的测量圆,方便监测洞顶平均竖向土压力、内外土柱相对沉降差。图中黑色测量圆监测洞顶竖向土压力,黑色十字监测土颗粒竖向位移。截面与测量圆具体位置如图 3 所示。

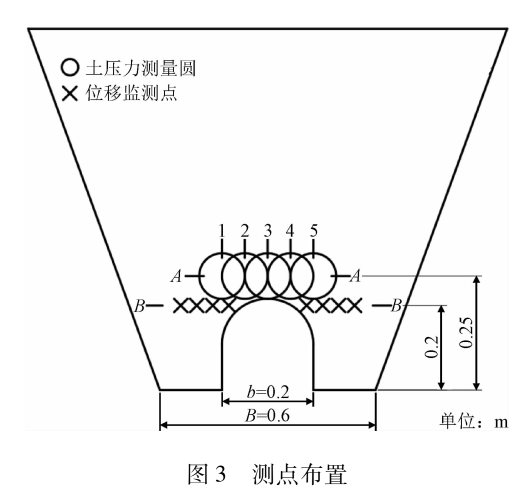


图 3　测点布置

Fig. 3　Arrangement of measurement circles

1.3　材料细观参数选取

回填土选用文献[23]中相对压实度为 85%,黏聚力为 31.11 kPa,内摩擦角为 28.2°的黄土进行数值模拟。考虑到黄土间的黏聚力,分别采用 Linear Contact Bond Model 和 Linear Contact Model 来模拟 ball-ball 和 ball-wall 的接触。考虑到地基经过特殊加固处理,明洞结构由钢筋混凝土浇筑而成,变形较填土小的多,故可将地基和明洞视为刚性。根据相关文献[22,24]中的经验,采用刚度为 10^{10} N/m 的墙单元 (wall) 来模拟地基与明洞结构。

由于在 PFC2D 中,宏观参数无法直接被程序识别,需要获取填土的细观参数,因此需要利用参数标定的方法获取与宏观参数相对应的细观参数,建立数值双轴压缩试验模型,调整细观参数,使样本宏观性质与试验宏观参数一致。所得细观参数见表 2。

利用摩尔-库伦强度准则对决定黄土力学特征的两个宏观指标:内摩擦角和黏聚力进行标定。方法如下:①利用 PFC2D 自带的围压伺服控制程序,分别设置 50、75、100 kPa 围压,得到样本在不同围压下的第一主应力峰值强度;②利用 3 种围压下的主应力峰值强度绘制摩尔应力圆;③做出摩尔应力圆的公切线,得到样本土体的内摩擦角与黏聚力。数值双轴试验模型尺寸为 $B\times H=1\ 200$ mm $\times 2\ 400$ mm。

加载的偏应力-应变曲线如图 4,绘制的摩尔应力圆如图 5。

样本土体内摩擦角和黏聚力的试验结果和数值模拟结果见表 3(试验结果为文献[21]通过黄土压缩及强度特性试验得到的内摩擦角与黏聚力;模拟结果为通过 PFC2D 模拟双轴压缩试验标定得到的内摩擦角与黏聚力)。两者内摩擦角均在 28°附近,黏聚力差值仅 1.79 kPa,说明数值模拟的结果吻合。

表 2　样本土体细观参数

Fig. 2　Micromechanical properties for PFC model

参数	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	粒径/mm	法向刚度/($N \cdot m^{-1}$)	切向刚度/($N \cdot m^{-1}$)	摩擦系数	法向黏结强度/($N \cdot m^{-1}$)	切向黏结强度/($N \cdot m^{-1}$)
土体颗粒	3 600	6 ~ 10	5×10^7	2.5×10^7	0.8	600	600

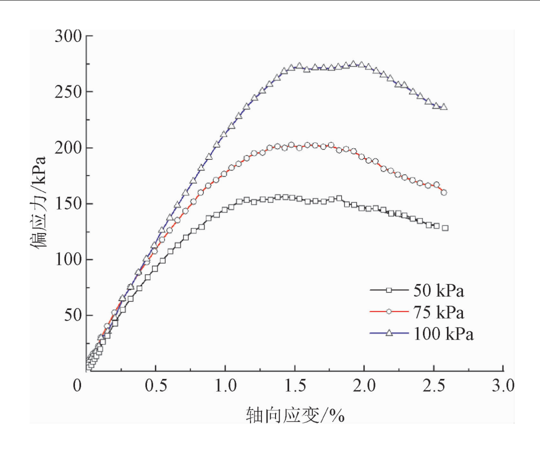


图 4　偏应力-应变关系

Fig. 4　Relationship between deviatoric stress and axial strain

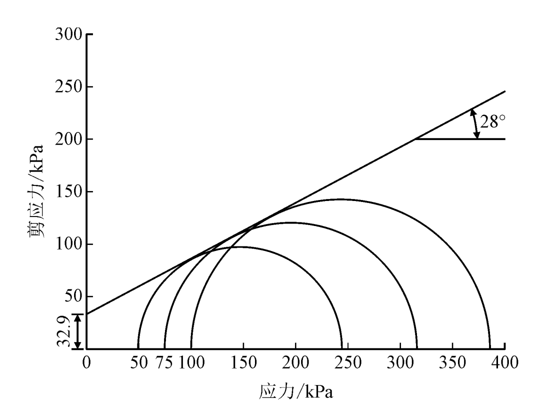


图 5　摩尔应力圆

Fig. 5　Mohr's stress circle

表 3　样本土体试验结果和数值模拟强度指标对比

Tab. 3　Comparison of strength indexes of sample soil between field test and numerical simulation

压实度	内摩擦角/(°)		黏聚力/kPa	
	试验结果	模拟结果	试验结果	模拟结果
85%	28.2	28.0	31.11	32.90

2　结果分析

2.1　洞顶竖向平均土压力分析

为了获得各工况下明洞洞顶平均竖向土压力的大小,首先利用图 3 中布置的 1 ~ 5 号测量圆对相应位置处的竖向土压力进行监测;再通过"等效荷载法"求得各个工况对应的洞顶竖向平均土压力;比较各工况下洞顶平均土压力的大小,分析明洞采用不同截面型式和不同槽宽比对洞顶土压力的影响规律。各工况洞顶平均竖向土压力见图 6。

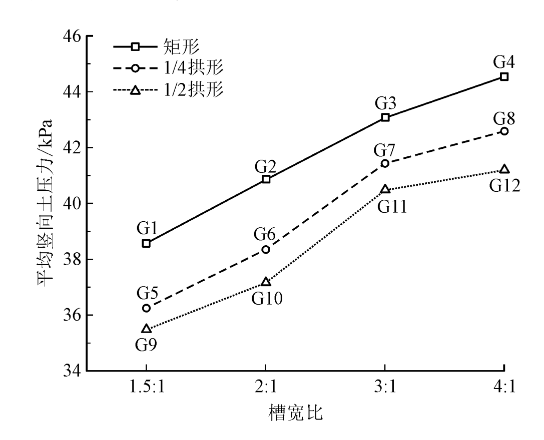


图 6　各工况洞顶平均竖向土压力变化

Fig. 6　Variations of average vertical earth pressure under different cases

2.1.1　截面型式对洞顶竖向平均土压力的影响

由图 6 可知,当 B/b 确定时,由于矩形截面明洞对洞顶土体的竖向支撑,内土柱向两侧移动困难,而 1/4 拱形截面和 1/2 拱形截面明洞的顶板为"拱形",相当于一个滑移面,有利于内土柱向明洞两侧移动,从而降低洞顶的竖向土压力。此外,1/2 拱形截面拱脚部分较拱冠部分的坡度变化比 1/4 拱形截

面大,更利于土体向明洞两侧滑移,因此,最终洞顶平均竖向土压力为:矩形截面 > 1/4 拱形截面 > 1/2 拱形截面。

2.1.2　*B*/*b* 对洞顶竖向平均土压力的影响

由图6可知,明洞截面型式一定,*B*/*b* 的增大对洞顶平均竖向土压力的影响规律基本一致。对1/2拱形截面明洞对应的4种工况进行分析可知,洞顶平均竖向土压力大小为:G9 < G10 < G11 < G12。其原因是随着 *B*/*b* 的增大,明洞与两侧边坡对其中间部分填土的支撑作用和摩阻作用被削弱,边坡效应逐渐减弱,两侧土体相对于洞顶土体向下沉降增加,从而导致洞顶附加土压力增大,洞顶平均竖向土压力相应增大。

2.2　明洞内外土柱沉降差分析

利用图3中布置的位移监测点对相应位置处的土颗粒竖向位移进行监测;再分别计算明洞内外土体的平均沉降,得到各个工况下的内外土柱相对沉降差,分析明洞采用不同截面型式与槽宽比对沉降差的影响规律。各个工况下明洞内外土柱沉降差大小如图7所示。

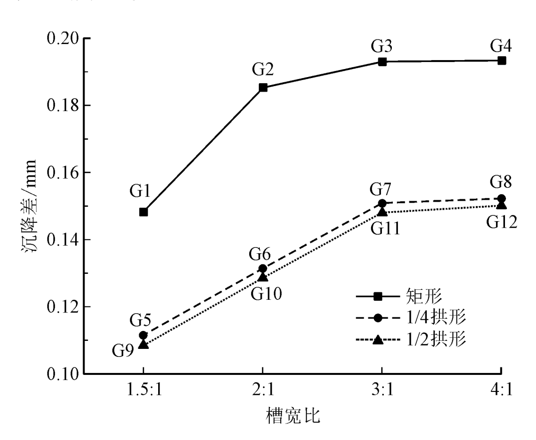


图7　各工况内外土柱沉降差变化

Fig.7　Variation of differential settlement under different cases

2.2.1　截面型式对明洞内外土柱沉降差的影响

由图7可知,当槽宽比 *B*/*b* 一定时,由于矩形截面明洞对洞顶土体的竖向支撑,内侧土体向两侧移动困难,因此,相对于拱形截面,矩形截面内侧土体的沉降更小。而拱形截面由于顶板为"拱形",为内侧土体向下滑动提供了一个滑移面,使得内侧土体沉降更大,导致内外土柱相对沉降差更小。此外,1/2拱形截面相对于1/4拱形截面,更有利于土体向明洞两侧滑移,因此,最终明洞内外土柱沉降差为:矩形截面 > 1/4 拱形截面 > 1/2 拱形截面。

2.2.2　*B*/*b* 对明洞内外土柱沉降差的影响

由图7可知,明洞截面型式一定,*B*/*b* 的增大对明洞内外土柱沉降差的影响规律基本一致。对1/2拱形截面明洞对应的4种工况进行分析可知,各工况下明洞内外土柱沉降差大小为:G9 < G10 < G11 < G12。随着 *B*/*b* 的增大,边坡对明洞两侧土体的剪切力被削弱,边坡效应逐渐减弱,明洞两侧土体沉降增大,从而导致内外土柱沉降差的增大。

2.3　颗粒间接触力链分析

在PFC2D中,荷载的传递是通过接触力链(contact force chain)来表征的,力链越密集,接触力越大;线条组成的网络结构代表接触力的分布集度和荷载传递方向。tension与compression分别代表拉、压力链。

2.3.1　截面型式对接触力链的影响

选取工况G1、G5、G9分析截面型式对接触力链的影响。

由于颗粒间的相对滑动以及黄土自身的黏聚力,导致明洞周围产生了张拉力链。由图8可知,对于矩形截面,由于明洞顶板内、外侧土颗粒存在相对位移,拉力主要分布于明洞顶板两侧。而对于拱形截面,张拉力链主要分布在顶板上方,其原因是"拱形"顶板可以视为一个滑移面,使得颗粒间的位移主要发生在拱形顶板上方。

对比分析图8(a)~(c),由于截面顶板型式的影响,G1工况下,在填土荷载作用下颗粒相互挤压重叠,接触趋于紧密,导致洞顶接触力链呈竖向分布。而G5、G9工况洞顶接触力链均沿顶板"拱形"轮廓呈发散状分布。

其中,G5工况的接触力链线条分布于整个顶板轮廓,而G9工况的接触力链线条则主要集中在拱顶处,这是因为G5工况的滑移面更加平缓,颗粒转移趋势较缓。G1、G5、G9工况在明洞顶中心处(图3中3号测量圆处)均存在局部应力集中现象,应力集中程度为:G1 < G5 < G9,洞顶中心处应力集中系数(明洞顶中心处土压力与洞顶平均土压力的比值)分别为1.08、1.13、1.25。

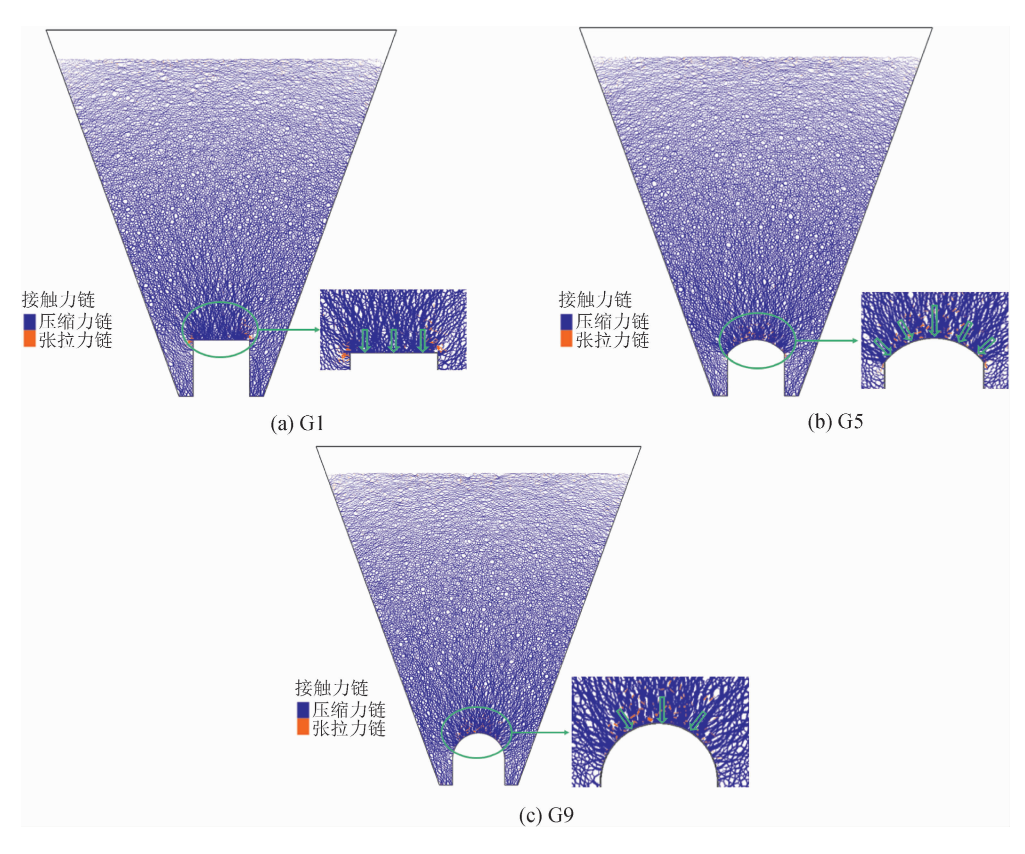


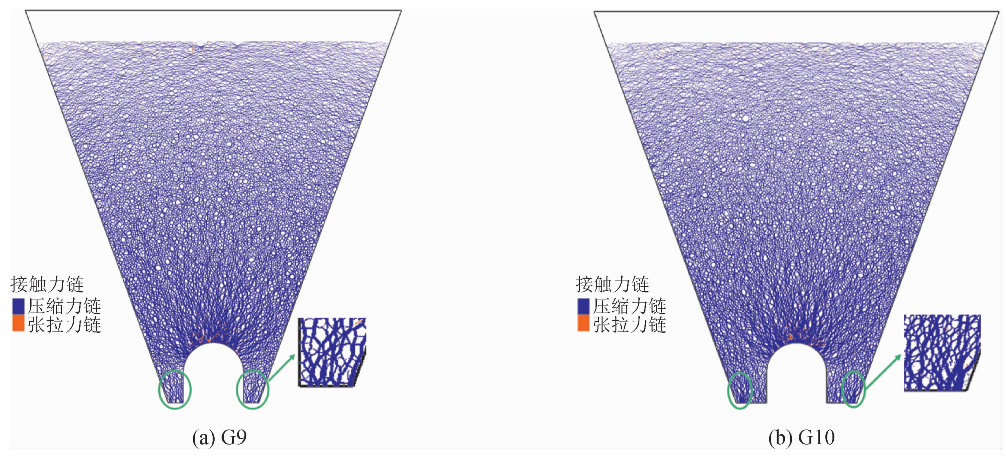
图 8　不同截面型式下洞顶接触力链分布

Fig. 8　Distributions of the force chains on the top of cut-and-cover tunnel with different sections

2.3.2　*B/b* 对接触力链的影响

选取工况 G9、G10、G11、G12 分析 *B/b* 对接触力链的影响。滑移面的存在与颗粒间的黏聚力导致了拱顶上方张拉力链的产生。由图 9 可知，*B/b* 较小时，明洞两侧由于空间狭小，导致土颗粒在洞脚上方相互挟持、搭接形成土骨架，无法沿边坡向下沉积，土颗粒间接触较弱，力链相对稀疏。随着 *B/b* 的增大，明洞两侧空间扩大，土颗粒能够顺利沿边坡向下沉积，洞脚处颗粒受到的土体荷载增加，土颗粒间接触增强，接触力链开始发展、延伸，力链网络逐渐密集。

同时，由于 *B/b* 增大，明洞与两侧边坡对其中间部分填土的楔紧作用变弱，促进了明洞与边坡之间的土体向下沉积，洞顶上方土颗粒被进一步压密，颗粒间接触紧密，力链网络更加密集，这也符合前述截面型式一定，明洞洞顶平均竖向土压力随着 *B/b* 的增大而增大的宏观规律。



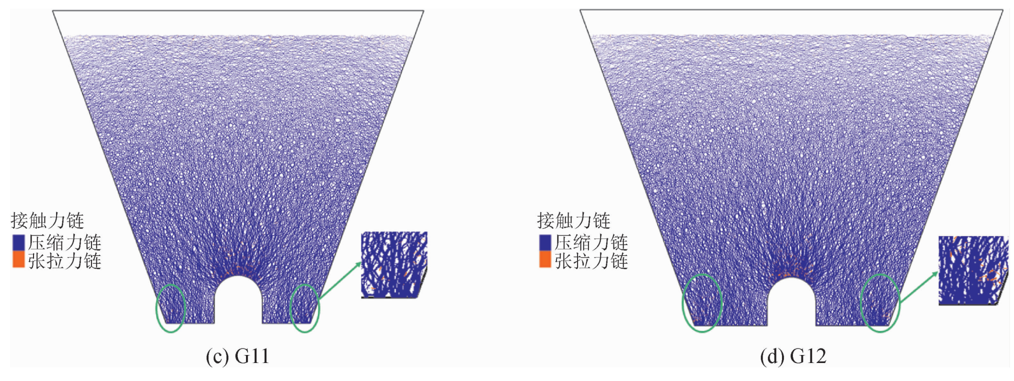


图9　不同 B/b 下接触力链分布

Fig. 9　Distributions of the force chains with different B/b ratio

3　沉降差与土压力间的函数关系

对于高填明洞，由于明洞与两侧土体的刚度差异较大，在土体自重的作用下，明洞上方内外土柱将会发生不均匀沉降，产生内外土柱沉降差。由于明洞上方外侧土柱沉降大于内侧土柱，内侧土柱将受到来自外侧土柱向下的剪切力，从而产生了附加土压力。明洞洞顶在承受回填土自重的同时，还需要承受由内外土柱不均匀沉降引起的附加土压力。

由前述数值模拟可知，随着截面型式与槽宽比的改变，高填明洞洞顶土压力与沉降差均同时增大或减小；笔者认为附加土压力是由沉降差引起的，因此为了明确沉降差与土压力之间的关系，首先需找到沉降差与附加土压力的函数关系。提取不同填土高度下的洞顶平均土压力与沉降差，分析沉降差与附加土压力之间的函数关系。为使监测点所测填土沉降为内外土柱沉降差，需保证填土高度范围内存在等沉面，由文献[25]可知，高回填结构物等沉面高度为 $1.4b \sim 1.6b$，因此，控制回填土高度 $\geqslant 2b$，保证等沉面位于回填土高度范围内。

3.1　截面型式对函数关系的影响

选取 G3、G7、G11 工况，分析截面型式的改变对函数关系的影响。洞顶附加土压力是由于内外土柱沉降差而产生的，因此，内外土柱沉降差 $\delta = 0$ 时，认为附加土压力 $P_1 = 0$。如图 10 所示，随着沉降差的增大，各截面型式下的附加土压力均随之增大，由拟合曲线方程可以发现，1/4 拱形截面与 1/2 拱形截面下附加土压力随沉降差变化规律基本一致，因此认为拱形截面与矩形截面下的拟合曲线有较大的差别，由拟合曲线信息（表4）可知，对于拱形截面，k 的取值为

$$k^{(\mathrm{arch})} = \frac{151.1 + 148.9}{2 \times 126.82} = 1.18 k^{(\mathrm{rectangle})} \tag{1}$$

式中，$k^{(\mathrm{arch})}$、$k^{(\mathrm{rectangle})}$ 分别为拱形截面与矩形截面型式下 P_1-δ 曲线的斜率。

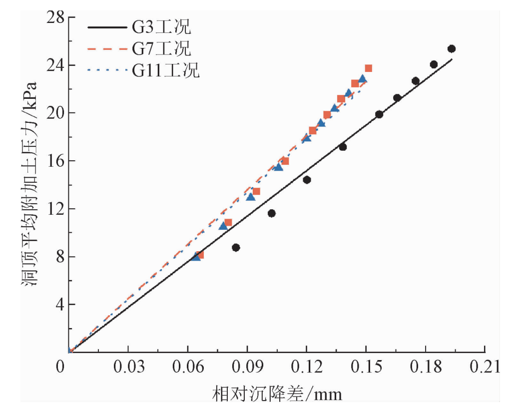


图10　G3、G7、G11 工况下的 P_1-δ 拟合曲线

Fig. 10　P_1-δ curve fitting for G3, G7, G11 working condition

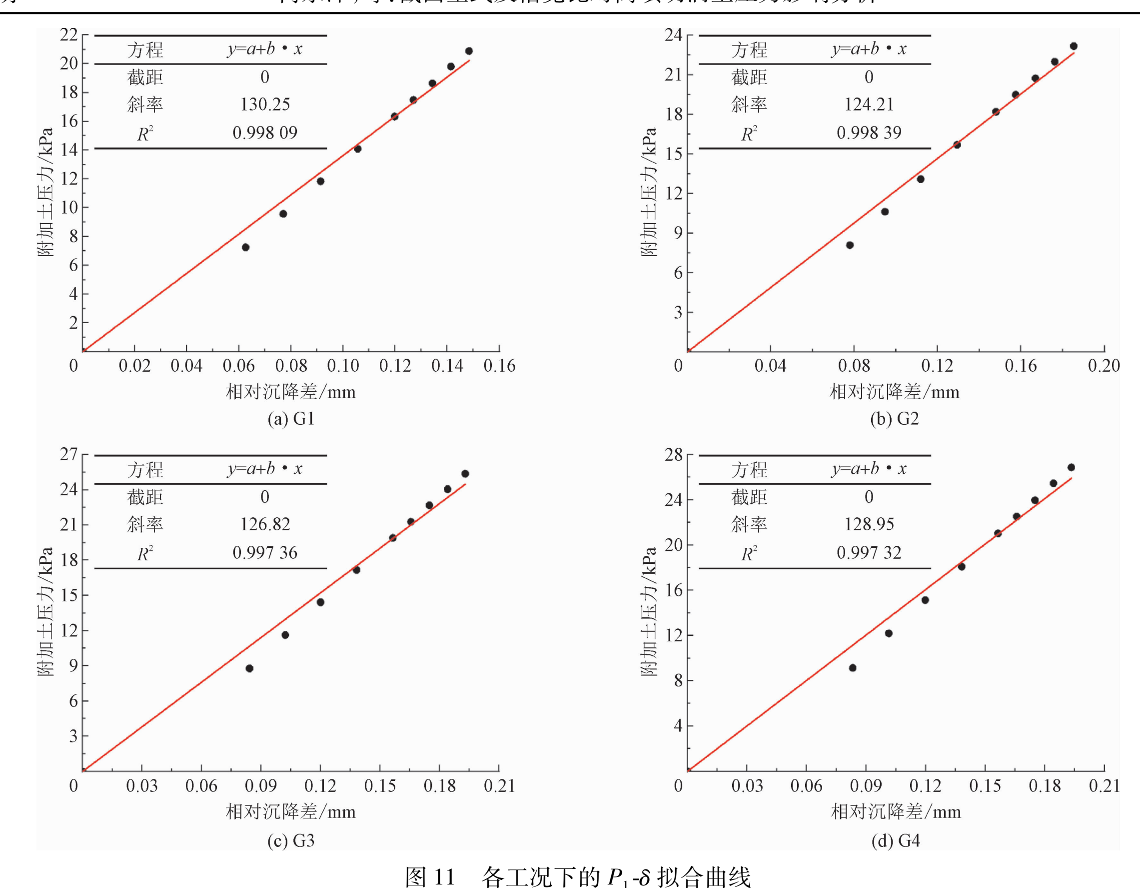
表4　线性拟合信息

Tab. 4　Fitting curve information

截面形式	矩形截面		1/4 拱形截面		1/2 拱形截面	
	斜率 k	R^2	斜率 k	R^2	斜率 k	R^2
值	126.82	0.997 36	151.17	0.997 24	148.85	0.997 74

3.2　B/b 对函数关系的影响

选取 G1、G2、G3、G4 工况，分析槽宽比的改变对函数关系的影响规律。分别对不同槽宽比下的附加土压力与沉降差进行线性拟合，如图 11 所示，随着沉降差的增大，各工况附加土压力均随之增大。不同槽宽比下，沉降差与附加土压力均呈正比例函数关系，函数斜率随槽宽比的变化规律不明显，且变化较小（最大误差仅为 4.6%）。由此，认为槽宽比的改变对斜率 k 的影响可忽略不计。



(a) G1　(b) G2　(c) G3　(d) G4

图 11　各工况下的 P_1-δ 拟合曲线

Fig. 11　P_1-δ curve fitting for each working condition

通过上述研究,由图 10、11 可知,沉降差与附加土压力大致呈正比例函数关系,由此可以得到高填明洞洞顶平均土压力关于沉降差的函数关系为

$$P = \gamma H + k\delta \tag{2}$$

式中:P 为洞顶平均土压力;H 为明洞上方填土高度;γ 为填土重度;δ 为内外土柱沉降差。

3.3　公式修正

由式(2)可知,高填明洞洞顶平均土压力可通过内外土柱沉降差来进行估算。对于系数 k 的确定,参考顾安全公式[2],令 P_1-δ 曲线的斜率 k 为

$$k = \frac{E}{b(1 - v^2)} \tag{3}$$

式中:E 为填土变形模量;b 为洞宽;v 为填土泊松比。

但是由于顾安全公式针对的是涵洞,而明洞相较于涵洞结构,跨径更大,受力更复杂,因此需要对该公式进行修正,使其可以适用于不同截面型式与槽宽比的高回填明洞结构。

由图 10 可知,截面型式的改变对式(2)中的系数 k 产生了较大的影响,由此引入一个截面型式修正系数 α 对式(2)进行修正,使其可以适用于不同截面型式的高填明洞土压力计算。由图 11 可知,槽宽比的改变对式(2)中的系数 k 影响较小,且规律性不强,由此认为槽宽比的改变对式(2)的影响可忽略。因此,高填明洞洞顶平均土压力 P 可以表示为

$$P = \gamma H + \alpha \frac{E}{b(1 - v^2)}\delta \tag{4}$$

式中,α 为截面型式修正系数,只考虑截面型式的影响。由于顾安全公式分析的是矩形截面,因此对于矩形截面,$\alpha = 1$;由式(1)可知,P_1-δ 曲线中 $k^{(\text{arch})} = 1.18k^{(\text{rectangle})}$,因此,对于拱形截面,$\alpha = 1.18$。

为验证所得公式的合理性,将文献[26]相关参数代入式(4)中(回填土参数取值见表 5),计算洞顶平均土压力为 37.77 MPa,与文献[26]试验结果 36.63 MPa 相比,误差仅为 3.11%。因此,认为修正所得公式是合理的。

表 5　计算参数

Tab. 5　Parameters for calculation

γ/(kN · m^{-3})	H/m	E/MPa	b/m	v	δ/mm
18.91	1.5	20.4	0.64	0.3	5.1

4 结 论

1)槽宽比一定,不同截面型式的减载效果为:1/2拱形 > 1/4 拱形 > 矩形,拱形截面会为内土柱提供一个滑移面,从而降低洞顶平均土压力,但会使拱顶产生局部应力集中。因此,选用坡度适中的拱形截面对明洞结构更加有利。

2)截面型式一定,B/b 越小,边坡的作用越强,洞顶土压力降低,因此,可以通过减小槽宽比,例如在两侧边坡施加混凝土柱来减小 B/b,进而达到减载的目的。

3)相比矩形截面,拱形截面下较小的沉降差会产生相同的附加土压力,更有利于结构的稳定。参考顾安全公式,提出适用于不同槽宽比与截面型式下的高填明洞土压力计算方法。

参考文献:

[1] 黄明琦,张明聚,李云超. 厦门海底隧道明洞回填前后结构安全性分析[J]. 北京工业大学学报,2008,34(3):265-270.
HUANG Mingqi,ZHANG Mingju,LI Yunchao. The structure safety analysis of cut-and-cover section of Xiamen sub-sea tunnel before and after backfilling[J]. Journal of Beijing University of Technology,2008,34(3):265-270(in Chinese).

[2] 王焕,李盛. 高填矩形、拱形截面明洞土压力差异性规律研究[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(11):1765-1771.
WANG Huan,LI Sheng. Study of difference laws of earth pressure between high-filled open-cut tunnels with rectangular and arched cross-section[J]. Tunnel construction,2018,38(11):1765-1771(in Chinese).

[3] 李永刚,李珠,张善元. 矩形沟埋涵洞顶部垂直土压力[J]. 工程力学,2008,25(1):155-160.
LI Yonggang,LI Zhu,ZHANG Shanyuan. Earth pressure on the top of rectangular trench-buried culverts[J]. Engineering mechanics,2008,25(1):155-160(in Chinese).

[4] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究[J]. 岩土工程学报,1981,3(1):3-15.
GU Anquan. Investigation of the vertical earth pressure on projecting conduit and underground chamber under a high embankment [J]. Chinese journal of geotechnical engineering,1981,3(1):3-15 (in Chinese).

[5] 郑俊杰,陈保国,张世飙. 沟埋式涵洞非线性土压力试验研究与数值模拟[J]. 岩土工程学报,2008,30(12):1771-1777.
ZHENG Junjie,CHEN Baoguo,ZHANG Shibiao. Experimental investigation and numerical simulation of nonlinear earth pressure for trench-buried culverts[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2008,30(12):1771-1777(in Chinese).

[6] 周文欢. 高填路堤下涵洞结构型式研究[D]. 西安:长安大学,2006.

[7] VASLESTAD J,JOHANSEN T H,HOLM W. Load reduction on rigid culverts beneath high fills:Long-term behavior[M]//Field Performance of Structures and Nondestructive Evaluation of Subsurface Infrastructure. Washington DC: Transportation Research Board, 1993:58-68.

[8] OKABAYASHI K, OHTANI W, AKIYAMA K, et al. Centrifugal model test for reducing the earth pressure on the culvert by using the flexible material[C]//The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference. Richardson,Texas,USA:OnePetro, 1994:ISOPE-I-94-092.

[9] 白冰. 高填土下刚性结构物竖向土压力减荷方法[J]. 岩土力学,1997,18(1):35-39.
BAI Bing. The measure for reducing the vertical earth pressure on the buried rigid structure[J]. Rock and soil mechanics,1997,18(1):35-39(in Chinese).

[10] LEE H J,ROH H S. The use of recycled tire chips to minimize dynamic earth pressure during compaction of backfill[J]. Construction and building materials,2007,21(5):1016-1026.

[11] 李盛,卓彬,王起才,等. 高填方黄土明洞顶 EPS 板和土工格栅共同减载计算及土拱效应分析[J]. 中国铁道科学,2018,39(1):16-22.
LI Sheng,ZHUO Bin,WANG Qicai,et al. Load reduction calculation and soil arch effect analysis for high fill open cut tunnel in loess area under joint action of EPS and geogrid[J]. China railway science,2018,39(1):16-22(in Chinese).

[12] 李盛,王起才,马莉,等. 高填黄土明洞土拱效应及土压力减载模型分析[J]. 土木工程学报,2014,47(7):118-125.
LI Sheng,WANG Qicai,MA Li,et al. Model analysis of earth pressure load reduction and soil arch effect for high fill open cut tunnel in loess area[J]. China civil engineering journal,2014,47(7): 118-125(in Chinese).

[13] 李盛,李善珍,王起才,等. EPS 板卸载的高填黄土明洞模型试验和数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊1):3394-3401.
LI Sheng,LI Shanzhen,WANG Qicai,et al. Unloading model test and numerical simulation analysis on high fill loess open cut tunnel with EPS[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2016,35(S1):3394-3401(in Chinese).

[14] 姚玉相,李盛,马莉,等. 基于颗粒流的高填黄土明洞加筋减载数值模拟分析[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(9): 1461-1470.
YAO Yuxiang,LI Sheng,MA Li,et al. Numerical simulation of re-

inforcement load reduction for high-filled open-cut tunnel based on particle flow[J]. Tunnel construction,2019,39(9):1461-1470(in Chinese).

[15] 姚玉相,李盛,马莉,等. 高填黄土明洞卸载结构土拱效应离散元分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(3):84-93.
YAO Yuxiang,LI Sheng,MA Li,et al. DEM analysis on soil arching effect of unloading structure of high-filled open cut tunnels [J]. Modern tunnelling technology,2021,58(3):84-93(in Chinese).

[16] 李明,严松宏,李盛,等. 采用泡沫轻质土对高填明洞二次回填的结构受力特性研究[J]. 铁道学报,2022,44(2):135-142.
LI Ming,YAN Songhong,LI Sheng,et al. Study on structural mechanical behavior of secondary backfill of high filled open cut tunnel with foamed lightweight soil[J]. Journal of the China Railway Society,2022,44(2):135-142(in Chinese).

[17] 匡亮,陈赤坤,谭永杰,等. 沟谷山区城市超厚填土铁路明洞设计[J]. 铁道工程学报,2013,30(12):51-56.
KUANG Liang,CHEN Chikun,TAN Yongjie,et al. Design of extra-high filling urban railway open cut tunnel in valley mountain area [J]. Journal of Railway Engineering Society,2013,30(12):51-56 (in Chinese).

[18] 杨雄,华科,琚国全,等. 超大跨度超高回填荷载明洞衬砌结构选型探讨[J]. 高速铁路技术,2013,4(3):62-67.
YANG Xiong,HUA Ke,JU Guoquan,et al. Research on selection of structure patterns for open-cut tunnel with super large-span and ultra high backfill load[J]. High speed railway technology,2013,4 (3):62-67(in Chinese).

[19] 谭永杰,匡亮. 大跨超厚回填土明洞衬砌结构选型及设计优化研究[J]. 高速铁路技术,2017,8(3):32-36.
TAN Yongjie,KUANG Liang. Study on lining structure selection and design optimization for large-span super high fill open cut tunnels[J]. High speed railway technology,2017,8(3):32-36(in Chinese).

[20] 周健,池永,池毓蔚,等. 颗粒流方法及 PFC2D 程序[J]. 岩土力学,2000,21(3):271-274.
ZHOU Jian,CHI Yong,CHI Yuwei,et al. The method of particle flow and PFC2D code[J]. Rock and soil mechanics,2000,21(3): 271-274(in Chinese).

[21] LAI H J,ZHENG J J,ZHANG J,et al. DEM analysis of "soil"-arching within geogrid-reinforced and unreinforced pile-supported embankments[J]. Computers and geotechnics,2014,61:13-23.

[22] LI S,HO I H,MA L,et al. Load reduction on high-filled cut-and-cover tunnel using discrete element method[J]. Computers and geotechnics,2019,114:103149.

[23] 李盛. 高填黄土明洞卸载结构的垂直土压力特性和计算方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.

[24] 史旦达,邓益兵,刘文白,等. 颗粒流离散元法及在砂土力学特性模拟中的应用[M]. 北京:人民交通出版社,2016.

[25] AASHTO. LRFD bridge design specifications[M]. 2nd ed. Washington:IEEE,1998.

[26] ZHUO B,ZHU M Y,FANG Y,et al. Numerical and experimental analyses for rubber-sand particle mixtures applied in high-filled cut-and-cover tunnels[J]. Construction and building materials, 2021,306:124874.

(编辑　李坤璐)